第 39 卷 第 6 期
2022 年 12 月
应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 39 No. 6
Dec. 2022

文章编号:1000-4939(2022)06-1125-10

吸湿对土粒比重测定的影响研究

曾兴[1,2],李裕恒[1],黄宽心[3],林志[1],苏佳[1],高桐[1]

(1. 湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室,411201 湘潭;2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室,310058 杭州;3. 湖南省地质矿产勘查开发局四一四队,413000 益阳)

摘 要:土粒比重通常采用比重瓶法进行测定,通过分析发现现行规范中的比重瓶法试验过程中会因为烘干土样存在吸湿行为导致测定结果偏小。通过 7 种土样的吸湿试验,发现黏粒含量最高的膨润土吸湿量最大,黏粒含量最低的砂土吸湿量最小。本研究基于规范中比重计算公式,推导了考虑土样吸湿影响下的真实比重计算公式,并探讨了烘干土样吸湿性对土粒的比重测定结果的影响,发现随着土样吸湿率的增大,比重值的误差随之增大。提出了一种改良的比重瓶法,该方法直接采用自然风干土样进行试验,避免了烘干土样吸湿对比重测试的影响。对 7 种土样分别进行了改良比重瓶法和传统比重法试验,对比发现:土类吸湿能力越强,则两种方法测得的比重值的差异越大。该改良方法的误差主要来自自然含水率测定误差,试验误差分析表明自然含水率值变化 ±0.5(含水率变化率 4.162% ~41.051%)对比重测试结果的影响不超过 0.9%,说明该测试方法较现行规范中的比重瓶法结果稳定、重复性好。

关键词:比重测定;比重瓶法;吸湿性;含水率

中图分类号:TU41 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.013

Influence of hygroscopicity on the determination of soil specific gravity

ZENG Xing[1,2],LI Yuheng[1],HUANG Kuanxin[3],LIN Zhi[1],SU Jia[1],GAO Tong[1]

(1. Hunan Province Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology,411201 Xiangtan,China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering,Zhejiang University,310058 Hangzhou,China; 3. Team 414 Hunan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development,413000 Yiyang,China)

Abstract: The specific gravity of the soil particles is usually measured by the pycnometer method. The author found that the moisture absorption behavior of the dried soil during the process of pycnometer method test in the current specification could result in a small measurement result. Through the moisture absorption test of seven kinds of soil,it was found that the bentonite with the highest clay content had the highest moisture absorption,and the sand with the lowest clay content had the smallest moisture absorption. The

收稿日期:2022-05-02 **修回日期:**2022-08-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41702329);湖南省教育厅科学研究资助项目(No. 17B097);湖南省自然资源厅资助项目(No. 2020-15);湖南省自然科学基金资助项目(No. 2022JJ40148)
通信作者:曾兴。E-mail: xzeng@hnust.edu.cn
引用格式:曾兴,李裕恒,黄宽心,等. 吸湿对土粒比重测定的影响研究[J]. 应用力学学报,2022,39(6):1125-1134.
ZENG Xing,LI Yuheng,HUANG Kuanxin,et al. Influence of hygroscopicity on the determination of soil specific gravity[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(6):1125-1134.

real specific gravity calculation formula considering the influence of soil's moisture absorption was derived based on the specific gravity calculation formula in the specification, and discussed the influence of the moisture absorption of dried soil on the determination result of specific gravity of soil particles. It is found that the error of specific gravity value increased with the increase of moisture absorption of soil samples. A modified pycnometer method is proposed, which directly uses natural air-dried soil for testing, avoiding the influence of the moisture absorption of the dried soil to the specific gravity test. The modified pycnometer method and the traditional pycnometer method were carried out on seven soils and it was found that the stronger the moisture absorption capacity of the soil, the greater the difference between the specific gravity values measured by the two methods. The error of the improved method mainly comes from the error of the natural moisture content determination, and the test error analysis shows that the influence of the change of natural moisture content value ±0.5 (the moisture content change rate is 4.162%-41.051%) on the the specific gravity test results does not exceed 0.9%, which indicates the test method is more sTab. and reproducible than the pycnometer method in the current specification.

Key words: specific gravity determination; pycnometer method; hygroscopicity; water content

比重是土的三项基本物理指标之一,是计算土的换算指标的一个必不可少的物理量,是土的其他参数如孔隙比、密度、压实度等的计算基础,是渗流稳定分析、边坡稳定性分析、道路弯沉值检测以及计算重量-体积参数和通过比重计分析确定细粒土壤的粒度分布曲线等工作中的基础参数。另外,比重还用于计算其他地质材料如城市垃圾等的压实、水力传导、抗剪强度和压缩性/沉降特性等[1-4]。因此比重的精确测定对于土的一系列指标的准确测定和计算十分关键,直接关系到相关工程判断和分析的准确性。一般来说,土粒比重 G_s 是土壤样品的固体物质质量与等体积 4 ℃时纯水的质量之比,无量纲[5-6],可表示为

$$G_s = \frac{m_s}{v_s \rho_{w_1}} = \frac{\rho_s}{\rho_{w_1}} \tag{1}$$

式中:m_s 为土粒质量(g);v_s 为土粒体积(cm^3);ρ_s 为土粒密度,即土粒单位体积的质量(g/cm^3);ρ_{w_1} 为纯水 4 ℃时的密度,等于 1 g/cm^3 或 1 t/m^3。

大多数土壤的 G_s 值在 2.60 ~ 2.80 之间[7]。土的比重通常用比重瓶法测定,比重瓶法适用于粒径小于 5 mm 的土,为最常用的比重测定方法,具有操作方便和重复性较好等优点,根据比重瓶不同的形状和标准,可运用于不同的测量领域[8-12]。前人对比重瓶法的研究主要是关注空气对比重测试结果的影响[13-16]。Bowles 等[13]研究认为比重瓶法误差的主要来源是土样孔隙中夹带的空气。而德克萨斯运输部[14]提出了一种沸腾法来去除土样孔隙中夹带的空气,以测定土壤中的 G_s。现行的美国规范[8]、英国规范[9]和中国规范[10]都明确要求需要通过持续抽真空或砂浴煮沸的方式去除土中空气,因此土中空气对比重测试的影响不大。

对于烘干土样的质量称量,英国和中国规范[9-10]均规定在试验前将土样进行烘干处理,再将烘干土样转移至比重瓶进行称量。其中的转移和称量过程均会与空气进行接触从而导致烘干土样吸湿。美国规范[8]规定对于一般土而言,烘干土样的质量称量放在了试验的最后一步,通过烘干再直接称量,尽可能地减少土样吸湿对比重测试的影响;对于一些含有易溶盐、亲水性胶体或有机质的的土壤,中性液体用煤油代替纯水,这样就无法在试验的最后一步进行烘干和称量,只能在试验前将土样烘干并称量好,这样就存在烘干土样与空气接触产生吸湿的问题。Mihoubi 等[17]指出干燥的土样会吸附空气中的水分直至平衡;王平全[18]和袁建滨[19]研究发现烘干的膨润土具有水合作用,放置在天然湿度的空气中,土粒会吸附空气中的水分子,且土粒越细,吸湿量就越大。

比重试验中规定土样为烘干样,但在实际试验操作中,烘干土样会暴露于空气中发生吸湿作用,从而对比重测试结果产生影响,尤其对吸湿性强的土类,其影响更加明显。吸收的水量会使实际加入比重瓶的土样质量变小,使得比重测试结果偏小。这将直接影响土的其他参数如孔隙比、密度、压实度等参数计算,直接关系到相关工程判断和分析的准确性[3]。

通过文献调研发现,膨润土比重数据存在较大

的离散性,对于同一产地的膨润土,文献中比重数据不尽相同,内蒙古高庙子膨润土比重数据范围为 2.397 ~2.66(表 1)。本研究针对高庙子膨润土土样进行了多次比重测试实验,测试的比重数据范围为 2.49 ~2.64,测试结果波动较大(表 1)。

表 1　高庙子膨润土比重值

Tab. 1　The specific gravity of Gaomiaozi bentonite

数据来源	比重值
文献[20]	2.397 ~2.61
文献[21]	2.66
文献[22]	2.65
文献[23]	2.66
文献[24]	2.55
文献[25]	2.59
本研究实测	2.49 ~2.64

表 1 中膨润土比重的波动有可能是烘干的膨润土样取出置于空气中时发生强烈的吸湿作用从而影响了比重的测定。而现行规范[10]中并没有关注比重试验过程中烘干土样的吸湿问题。

膨润土因为其强吸湿性对比重测定影响较大,而其他的土类的吸湿性及其对比重测定的影响又如何呢? 本研究针对包括膨润土在内的几种不同黏粒含量的土开展吸湿试验,对比重试验过程中土样吸湿引起的比重测试误差进行了讨论。针对该问题,本研究在传统比重瓶法的基础上提出了一种新的比重测定方法,对其进行了试验对比验证以及误差分析。

1　吸湿测试及误差来源分析

1.1　吸湿试验

为了确定烘干土样在空气中吸湿的大致规律,采用 7 种不同土样,分别为高庙子膨润土、贵州红黏土、湘潭黏土、绍兴原状淤泥土、高岭土、益阳黏土质砂和绍兴砂性土(具体参数见表 2),将其烘干并置于恒温恒湿环境下进行吸湿试验。

试验中所用的恒温干燥箱,可调控温度范围为 0 ℃ ~250 ℃;分析天平精度为 0.001 g;人工温湿度环境仓,可调节温、湿度,湿度调节范围为 0% ~100% ,温度调节范围为 -10 ℃ ~60 ℃,本研究中环境温度统一控制为 25 ℃,湿度为 80% 。

试验结果如图 1、图 2 所示。图 1 结果显示,土样吸湿率随时间的增长呈逐渐放缓趋势,其中膨润土吸湿率最高,绍兴砂性土吸湿率最低;考虑到比重试验土样称量时间较短,因此得到前 10 分钟的吸湿效率(μ)图(图 2),可看出土样在前期的吸湿效率均呈快速递减趋势,其中 0 ~2 min 内吸湿效率快,2 min后吸湿效率显著降低。结合表 2 可知,黏粒含量越大,吸湿率越大。

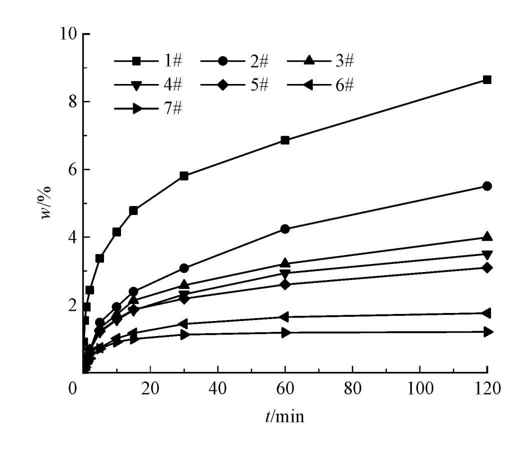


图 1　不同土样吸湿率随时间变化图

Fig. 1　The moisture absorption rate of different soil samples changes with time

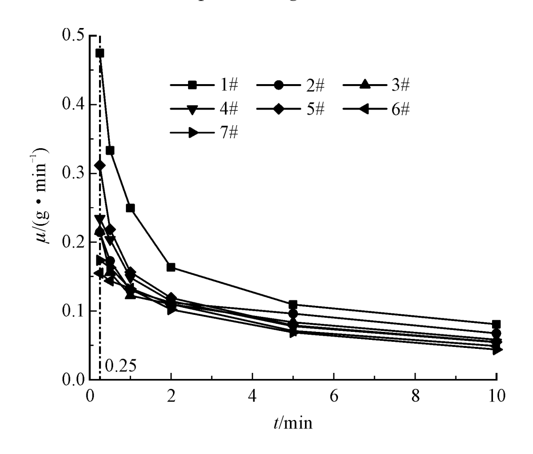


图 2　前 10 min 吸湿效率对比

Fig. 2　Comparison of moisture absorption efficiency in the first 10 minutes

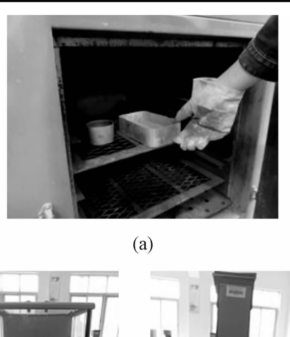
1.2　误差来源分析

在比重试验中,如图 3 所示,首先要将土样在 105 ℃ ~110 ℃温度下烘干(a),然后称取 15 g 烘干土样,装入干燥的比重瓶中(b ~c),然后向盛有土样的比重瓶中注入半瓶中性液体(d ~e)。在上述操作过程中,存在 2 个土样可能吸收空气中的水分的阶段。

表 2 7 种土的基本参数

Tab. 2 Basic parameters of 7 kinds of soil

土样编号	土样名称	土样类别	黏粒含量 CF/%	液限 w_L/%	塑限 w_P/%	塑性指数 I_p/%
1#	高庙子膨润土	高液限黏土 CH	86.8	269.7	35.7	234
2#	贵州红黏土	高液限黏土 CH	38.4	92.7	33.7	59
3#	湘潭黏土	高液限黏土 CH	32.6	59.2	26.5	32.7
4#	绍兴原状淤泥土	高液限黏土 CH	31.6	61.3	27.2	34.1
5#	高岭土	高液限黏土 CH	30.7	60.4	31.1	29.3
6#	益阳黏土质砂	黏土质砂 SC	7.2	36.8	21.4	15.4
7#	绍兴砂性土	粉土质砂 SM	5.8	35.3	23.1	12.2


(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

图 3 比重试验前期操作过程

Fig. 3 Prophase operation process of specific gravity test

一阶段(a ~ c):将烘干土样从烘箱中取出,到用天平称取适当质量的烘干土样加入比重瓶中为止。这 15 g 左右土样的称量并不会一次称量完毕,而是需要经过多次加入和称量,这一过程约需要几分钟。这段时间暴露于空气中的烘干土样会吸收空气中的水分,吸收的水量会导致实际加入的干土质量变小,从而使得比重测试结果偏小。

二阶段(d ~ e):从比重瓶中土样称量完成,到中性液体加入比重瓶覆盖土样为止。这一过程操作时间很短,大约需要几十秒钟。本阶段土样吸收空气中的水分会导致加入的中性液体体积变小,使得比重测试结果偏大。

仅考虑一阶段吸湿

$$G_s' = \frac{m_d}{m_{b(w/k)} + m_d - m_{b(w/k)s}} \cdot G_{(w/k)T} \tag{2}$$

土样质量

$$m_d = m_{w_1} + m_s = m_s\left(1 + \frac{w_1}{100}\right) \tag{3}$$

其中

$$m_{w_1} = \frac{w_1}{100} m_s \tag{4}$$

$$m_s = \rho_s v_s \tag{5}$$

比重瓶和纯水或中性液体总质量

$$m_{b(w/k)} = m_{w/k} + m_b = v\rho_{(w/k)} + m_b \tag{6}$$

比重瓶、纯水或中性液体和土样总质量

$$m_{b(w/k)} = m_{w/k}' + m_b + m_s + m_{w_1} \tag{7}$$

$$m_{(w/k)}' = v_{w/k}' \rho_{(w/k)} = (v - v_s - v_w)\rho_{(w/k)} \tag{8}$$

T ℃时纯水的比重

$$G_{(w/k)T} = \frac{\rho_{(w/k)}}{\rho_{w_1}} \tag{9}$$

将式(3) ~ 式(9)代入式(2)简化可得

$$G_s' = \frac{\rho_s v_s\left(1 + \frac{w_1}{100}\right)}{(v_s + v_{w_1})\rho_{(w/k)}} \cdot \frac{\rho_{(w/k)}}{\rho_{w_1}} = \frac{1 + \frac{w_1}{100}}{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \frac{w_1}{100}} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{w_1}}$$

$$= \frac{1 + \frac{w_1}{100}}{1 + \frac{w_1}{100} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{w_1}} \cdot \frac{\rho_{w_1}}{\rho_w}} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{w_1}} \tag{10}$$

将式(10)进一步简化可得

$$G_s' = G_s \cdot \frac{1 + \frac{w_1}{100}}{1 + \frac{w_1}{100} \cdot \frac{G_s}{G_{wT}}} \tag{11}$$

考虑一、二阶段吸湿

其中比重瓶、纯水或中性液体和土样总质量

$$m_{b(w/k)s} = m_{(w/k)}' + m_b + m_s + m_w \tag{12}$$

$$m_{w/k}' = v_{(w/k)}' \rho_{(w/k)} = (v - v_s - v_{w_1} - v_{w_2})\rho_{(w/k)} \tag{13}$$

$$m_w = m_{w_1} + m_{m2} \tag{14}$$

$$m_{w_2} = \frac{w_2}{100} m_s \tag{15}$$

将式(3)~(9)、式(12)~(15)代入式(2)简化可得

$$G_s' = \frac{\rho_s v_s\left(1+\frac{w_1}{100}\right)}{(v_s+v_{w_1}+v_{w_2})\rho_{(w/k)}-v_{w_2}\rho_w}\cdot\frac{\rho_{(w/k)}}{\rho_{w_1}} = \frac{\left(1+\frac{w_1}{100}\right)\cdot G_s}{1+\frac{\rho_s}{\rho_{w_1}}\cdot\frac{\rho_{w_1}}{\rho_w}\cdot\frac{w}{100}-\frac{\rho_s}{\rho_{w_1}}\cdot\frac{\rho_{w_1}}{\rho_w}\cdot\frac{w_2}{100}\cdot\frac{G_{wT}}{G_{(w/k)T}}} \tag{16}$$

将式(16)进一步简化可得

$$G_s' = \frac{1+\frac{w_1}{100}}{1+\frac{G_s}{100}\cdot\left(\frac{w}{G_{wT}}-\frac{w_2}{G_{(w/k)T}}\right)}\cdot G_s \tag{17}$$

式中：m_d为试样质量(g)；m_s为土粒质量(g)；m_w为水的质量(g)；m_b为比重瓶质量(g)；$m_{b(w/k)}$为瓶、水或中性液体总质量(g)；$m_{(w/k)}$为一比重瓶体积的水或中性液体质量(g)；$m_{b(w/k)s}$为瓶、水或中性液体、干土总质量(g)；$m'_{(w/k)}$为一比重瓶体积除去干土及其吸附水后所剩余体积的水或中性液体质量(g)；m_{w_1}为一阶段吸湿中水的质量(g)；m_{w_2}为二阶段吸湿中水的质量(g)；$\rho_{(w/k)}$为水或中性液体的密度(g/cm^3)；ρ_{w_1}为纯水在4 ℃时的密度(g/cm^3)；v为比重瓶体积(cm^3)；v_s为土粒体积(cm^3)；v_w为水的体积(cm^3)；$v'_{(w/k)}$为一比重瓶体积除去干土及其吸附水后所剩余的体积(cm^3)；w_1为试样一阶段吸湿的含水率(%)；w_2为试样二阶段吸湿的含水率(%)；w为试样两阶段总的含水率(%)；$G_{(w/k)T}$为T ℃时水或中性液体的比重，准确至0.001 g；G_{wT}为T ℃时纯水的比重，准确至0.001 g；G_s'为规范公式所得比重；G_s为试样真实比重，见式(1)。

对7种土样采用传统比重瓶法进行比重试验，分别考虑一、二阶段的吸湿情况，利用上述公式对试验结果进行计算修正和对比(图4、表3)，计算中假定第一阶段耗时为5 min，第二阶段耗时为0.5 min。

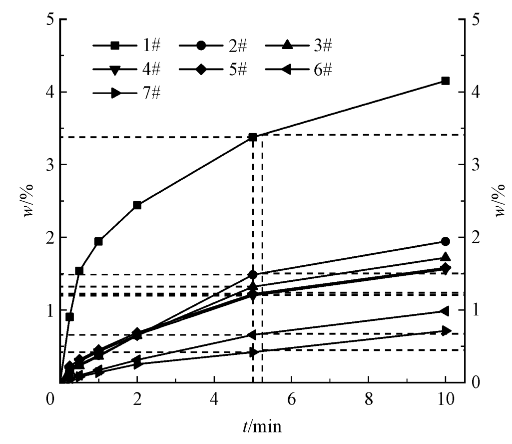


图4　一、二阶段吸湿率与时间的关系

Fig. 4　The relationship between the first and second stage moisture absorption rate and time

表3　一、二阶段吸湿对比重试验的影响

Tab. 3　The influence of the first and second stages of moisture absorption and specific gravity test

土样编号	试验值 $G_{s'}$	一阶段吸湿 w_1/%	二阶段吸湿 w_2/%	G_{s1}	G_{s2}	$\lvert G_{s1}-G_{s2}\rvert$	$\left\lvert\frac{G_{s1}-G_{s2}}{G_{s1}}\right\rvert\times100\%$
1#	2.643	3.376	0.035	2.799 0	2.798 3	0.000 7	0.026 1
2#	2.721	1.484	0.029	2.792 1	2.792 1	0	0
3#	2.679	1.319	0.026	2.739 9	2.739 9	0	0
4#	2.718	1.198	0.022	2.775 7	2.775 7	0	0
5#	2.678	1.221	0.027	2.733 0	2.733 0	0	0
6#	2.656	0.657	0.014	2.685 5	2.685 5	0	0
7#	2.601	0.418	0.008	2.618 7	2.618 7	0	0

由表3可知，二阶段吸湿仅对中性溶液非纯水时的试验结果有影响，对于中性液体为纯水的比重测试则无影响。其中二阶段的吸湿率和吸湿时间均远低于一阶段，且对一阶段的试验结果的影响微乎其微。因此，综合两个阶段的影响，常规的比重瓶法对土粒比重测定会导致比重测定结果偏小，且在后续分析中直接忽略二阶段吸湿的影响，仅考虑一阶段吸湿对比重的影响。

2　新方法的提出及试验验证

2.1　新方法的提出

为了解决比重试验中烘干土样吸湿对比重结果的影响，根据上文对土粒真实比重值G_s和试验比重值G_s'关系的推导，可继续推导出考虑试样吸湿影响

下的真实比重计算公式。

将式(11)进行变换得

$$G_s = \frac{G_s'}{1 + \frac{w_1}{100} - \frac{G'_s}{G_{wT}} \cdot \frac{w_1}{100}} \tag{18}$$

由于仅考虑一阶段吸湿,因此 $w_1 = w$,再将式(2)代入式(18)得

$$G_s = \frac{m_d}{\left(m_{b(w/k)} + m_d - m_{b(w/k)s}\right)\dfrac{1 + \frac{w}{100}}{G_{(w/k)T}} - \dfrac{w}{100} \cdot \dfrac{m_d}{G_{wT}}} \tag{19}$$

式中:m_d 为试样质量(g);$m_{b(w/k)}$ 为瓶、水或中性液体总质量(g);$m_{b(w/k)s}$ 为瓶、水或中性液体、干土总质量(g);w 为试样的含水率(%);$G_{(w/k)T}$ 为 T ℃时水或中性液体的比重,查表可得,准确至0.001 g;G_{wT} 为 T ℃时纯水的比重,查表可得,准确至0.001 g。

基于式(19),本研究提出一种改良的比重瓶法,这种方法不需要对加入比重瓶的土样进行烘干,而是直接采用自然含水率的土样进行试验。具体操作如下。

1)对试验所用的天然含水率或风干的土样用烘干法测定含水率 w。

2)将比重瓶烘干,当使用100 mL比重瓶时,应称取约15 g不做烘干处理的天然含水率试样或风干试样装入比重瓶中,当使用50 mL比重瓶时,则称取约12 g不做烘干处理的天然含水率试样或风干试样装入比重瓶中,准确至0.001 g。

3)可采用煮沸法或真空抽气法排除土中的空气。向已装有不做烘干处理的天然含水率试样或风干试样的比重瓶注入纯水至瓶的一半处,摇动比重瓶,将瓶放在砂浴上煮沸,煮沸时间自悬液沸腾起砂土不得少于30 min,细粒土不得少于1 h。煮沸时应注意不使土液溢出瓶外。

4)当土粒中含有易溶盐、亲水性胶体或有机质时,测定其土粒比重应用中性液体代替纯水,用真空抽气法代替煮沸法,排除土中空气。抽气时真空度应接近一个大气负压值(-98 kPa),抽气时间可为1~2 h,直至悬液内无气泡逸出时为止。

5)将中性液体或纯水注入比重瓶,当采用长颈比重瓶时,注入中性液体或纯水至略低于瓶的刻度处;当采用短颈比重瓶时,应注入中性液体或纯水至近满,有恒温水槽时,可将比重瓶放于恒温水槽内。待瓶内悬液温度稳定及瓶上部悬液澄清。

6)当采用长颈比重瓶时,用滴管调整液面恰至刻度处,以弯液面下缘为准液面下缘为准,擦干瓶外及瓶内壁刻度以上部分的中性液体或纯水,称瓶、中性液体或纯水、土总质量;当采用短颈比重瓶时,塞好瓶塞,使多余中性液体自瓶塞毛细管中溢出,将瓶外中性液体或纯水擦干后,称瓶、中性液体或纯水、土总质量。称量后应测定瓶内中性液体或纯水的温度。

7)根据测得的温度,从已绘制的温度与瓶、中性液体或纯水总质量关系中查得瓶、中性液体或纯水的总质量。

8)将测得的各项试验参数与试样平均含水率 w 代入式(19)计算即可得到真实比重值。规范中规定平行样误差±0.02,本方法测得的比重值误差也应满足该要求。

2.2 试验验证

为了对上述方法进行说明,本研究采用7种土类(高庙子膨润土、贵州红黏土、湘潭黏土、绍兴原状淤泥土、高岭土、益阳黏土质砂、绍兴砂性土)分别开展了基于改良方法和传统方法的比重测定试验。表4为7种土样分别采用两种方法测定的试验结果(其中膨润土比重试验采用的中性液体为煤油,其它均为纯水)。

表4 两种方法测定的试验结果

Tab.4 Test results determined by two methods

土样编号	试验结果			比重差值 $G_{s2}-G_{s1}$	$\frac{G_{s2}-G_{s1}}{G_{s2}}\times 100\%$
	传统方法 G_{s1}	改良方法 G_{s2}			
		自然含水率 w/%	比重值 G_{s2}		
1#	2.643	12.013	2.839	0.196	6.904
2#	2.720	7.660	2.810	0.090	3.203
3#	2.679	5.728	2.748	0.069	2.511
4#	2.718	3.625	2.784	0.066	2.371
5#	2.677	3.601	2.736	0.059	2.156
6#	2.656	1.606	2.685	0.029	1.080
7#	2.601	1.218	2.618	0.017	0.649

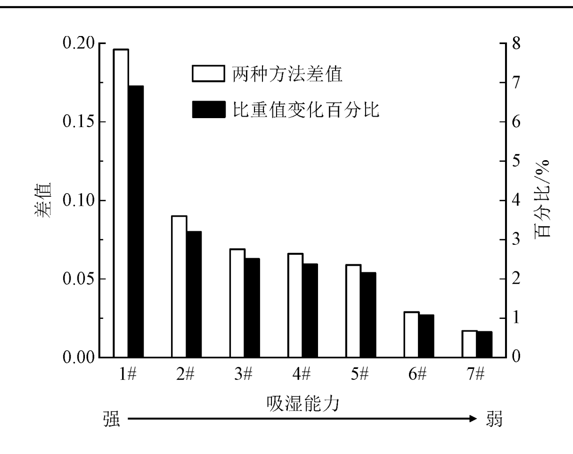


图 5　两种方法的差值与土类吸湿能力的关系

Fig. 5　The relationship between the difference between the two methods and soil's moisture absorption capacity

从表 4 可以看出,采用改良后的比重瓶法测得的不同土类比重值均大于采用传统比重瓶法测得的比重值,说明传统的比重瓶法存在试验过程中烘干土样吸湿的问题,这一问题直接导致测得的比重值偏小;图 5 表明不同的土类其吸湿能力不同,导致两种方法测得的比重值的差别也不同。土类吸湿能力越强,则两种方法测得的比重值的差异越大。因此,本研究提出的改良比重瓶法可有效避免吸湿性对比重测试的影响。

3　两种方法测试结果的比较与讨论

3.1　传统比重瓶法的误差分析

下面针对上述不同土类的比重试验结果,基于式(11)和式(20)对比重的测试误差进行分析。式(20)定义误差率 E 为真实比重值与试验比重值的差值与真实比重值之比,即

$$E = \frac{G_s - G_s'}{G_s} \times 100\% \qquad (20)$$

图 6 为土样吸湿率与比重试验值的关系,图 7 为土样吸湿率与比重误差值的关系图。如图 6、图 7 所示,随着土样含水率的增大,试验值的结果随之减小,误差率则随之增大,对于吸湿性最强的膨润土,当土样含水率达到自然含水率 12.013% 时,其比重测试结果由 2.839 减少至 2.370,误差率达到 16.489%;而对于吸湿性较差的绍兴砂性土,当土样含水率达到自然含水率 1.567% 时,其比重测试结果由 2.633 减少至 2.568,误差率达到 2.468%。这表明吸湿量越大对比重测试误差率的影响也越大,即同一比重测定条件下,误差率随土样吸湿能力的增大而增大。

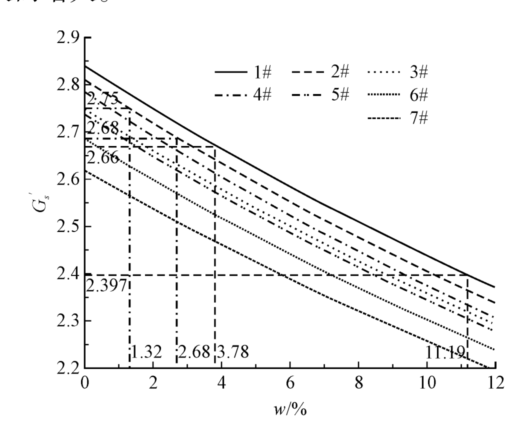


图 6　土样吸湿率与比重试验值(传统方法)的关系

Fig. 6　The relationship between soil moisture absorption rate and specific gravity test value (traditional method)

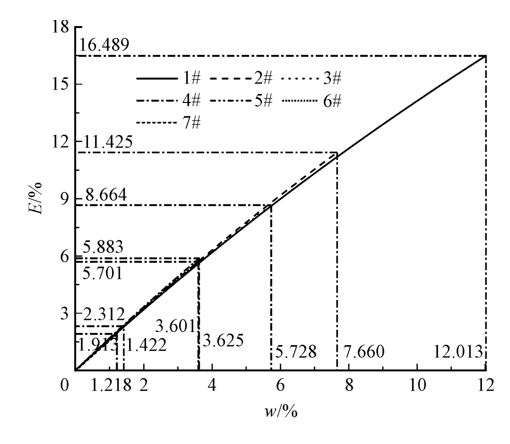


图 7　土样吸湿率与比重误差值的关系

Fig. 7　The relationship between the moisture absorption rate of soils and the specific gravity error value

基于上述的分析和试验可对不同学者的比重试验结果进行分析讨论。由图 6、图 7 可知叶为民[21,23]得出的高庙子膨润土比重值 $G_s = 2.66$ 对应含水率 $w = 3.78\%$,误差率 $E = 5.847\%$,由图 4 可知其相应的吸湿时间约为 6.5 min,这一时长在比重试验中处于正常范围内;而刘月妙[20]得有出的高庙子膨润土比重值范围中最小值 $G_s = 2.397$ 对应的含水率 $w = 11.19\%$,误差率 $E = 15.534\%$,由图 1 可知其相应的吸湿时间超过 120 min,这一时长远超比重试验所需时间,可能是其他原因导致了比重误差。对于一般的黏土,如贵州红黏土,廖义玲等[26]和朱建群等[27]分别测得其比重值 $G_s = 2.75$,$G_s = 2.68$,其中比重值 $G_s = 2.75$ 所对应的含水率 $w = 1.32\%$,误差率 $E = 2.169\%$,由图 4 可知其相应的吸湿时间约为 4.4 min,这一时长在比重试验中处于正常范围

内;而 $G_s = 2.68$ 所对应的含水率 $w = 2.68\%$,误差率 $E = 4.324\%$,由图 1 可知其相应的吸湿时间约为 20 min,这一时长超出比重试验所需时间,可能是其他原因导致了比重误差。这也间接表明现行规范中的比重瓶法未关注烘干土样的吸湿性问题,可能导致比重的测试结果不稳定。

3.2 称量不及时对比重试验结果的影响

在比重试验中不同实验人员在称量烘干土并将其加入比重瓶这一操作过程中存在主观性,因此称量不及时导致土样吸湿对比重试验结果产生影响。因此,结合图 1 和式(19)可得不同土类比重值随吸湿时间的变化规律,如图 8 和图 9 所示。由图 8 可知土样比重试验值随土样吸湿时间的增加而减小,且减小的程度与土样的吸湿能力有关。一般而言,在同一温湿度环境下,土样吸湿能力越强其比重试验值随吸湿时间的增加而减小地越快。

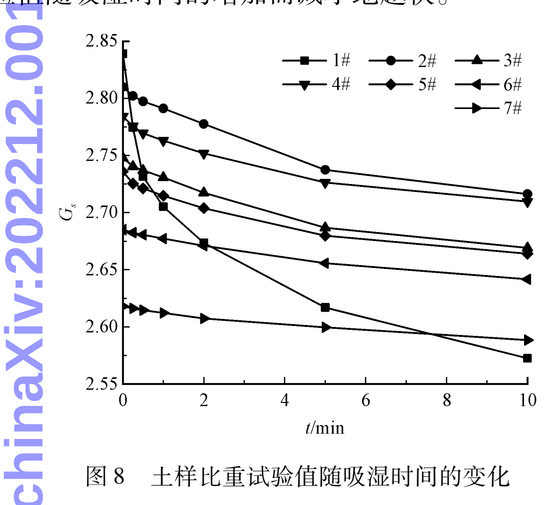


图 8 土样比重试验值随吸湿时间的变化

Fig. 8 Changes of soil's specific gravity test value with moisture absorption time

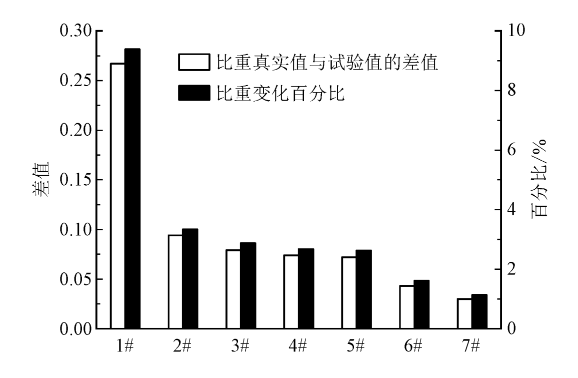


图 9 10 min 吸湿时长对不同土样比重试验值的影响

Fig. 9 The influence of 10 min moisture absorption time on the value of different soil's specific gravity tests

由图 9 可看出不同土类在吸湿 10 min 后比重试验值均有不同程度的变化,初始比重试验值最高的高庙子膨润土在吸湿 10 min 后其比重试验值降至为 7 种土类中的比重试验值最小值,差值为 0.267,变化幅度达到了 9.39%;而吸湿能力较差的绍兴砂性土的两种比重值差值为 0.030,变化幅度仅为 1.132%。这也再次表明了土样的吸湿性对传统方法比重的测定是有影响的,且影响程度与土样的吸湿能力有关。

3.3 改良方法的稳定性分析

本研究提出的改良比重瓶法的误差主要来源于土样含水率的测试是否准确。实际测试中,平行土样含水率测试结果均会存在相应的波动。因此本研究选用上述 7 种土类,基于式(19)分析了含水率细微波动(基于自然含水率,$\Delta w = \pm 0.5\%$)对比重值的影响。如图 10 所示,不同土样平行试样含水率变化 ±0.5% 时,对应的真实比重变化均约为 ±0.024内。

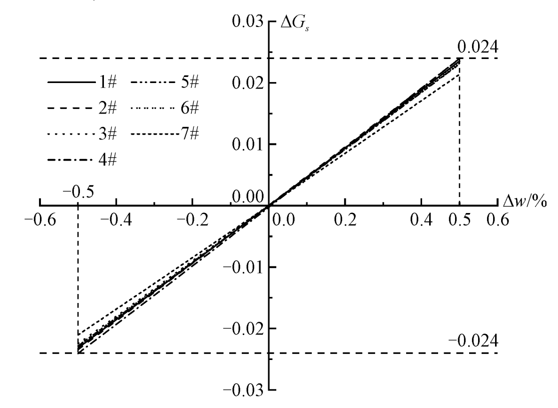


图 10 平行试样含水率误差与比重误差值的关系曲线 (w 为自然含水率,$\Delta w = \pm 5\%$)

Fig. 10 The relationship between the error of moisture content of parallel samples and the error of specific gravity (w is the natural moisture content, $\Delta w = \pm 5\%$)

图 11 为不同土类含水率变化与相应比重变化的对比,表示 ±0.5% 的含水率变化对于不同土类的总的吸湿率占比不同,但对土样比重的测定却影响不大。例如对于吸湿性强的膨润土而言,0.5% 含水率变化占总吸湿率的 4.162%,对比重测定的影响为 0.821%,而对于吸湿性较弱的绍兴砂性土而言,0.5% 含水率变化占总吸湿率的 41.015%,对比重测定的影响为 0.801%。对于其他土类,0.5% 含水率变化在相应总吸湿率的占比各不相同,但对各自比重的影响均小于 0.9%,因此可知含水率变化对比重测试结果影响较小。由于含水率测试结果波动不

大，因此，该比重测试方法结果稳定、重复性好。

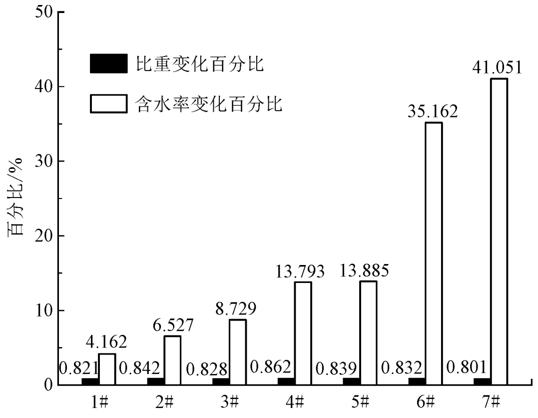


图 11　不同土类含水率变化与相应比重变化的对比（w 为自然含水率，$\Delta w = \pm 5\%$）

Fig. 11　Comparison of changes in water content of different soils and corresponding changes in specific gravity（w is natural water content，$\Delta w = \pm 5\%$）

4　结束语

本研究基于现行规范中比重瓶法的比重计算公式，探讨了不同烘干土样吸湿率对土粒比重测定结果的影响，发现现行规范中烘干土样在试验过程中会存在吸湿的问题，因此常规的比重瓶法会导致比重测试结果偏小，一般随着土样吸湿能力越强，比重值的误差也随之增大。在上述基础上推导出了含有含水率的比重计算公式，并基于此提出了一种改良的比重瓶法。该方法直接采用自然风干样，规避了试验过程中土样吸湿性对于结果的不利影响，并基于试验结果，采用理论推导可得土样比重的精确值。对 7 种不同土样开展了传统方法与改良方法的试验对比，结果表明改良方法的试验结果均高于传统方法的试验结果，且土样吸湿能力越强，两种方法的试验结果差值越大，如对于吸湿性强的膨润土，两种方法的试验结果差值达到了 0.196，而吸湿性较差的绍兴砂性土两种方法的试验结果差值是 0.017。因此本研究提出的改良比重瓶法可有效避免吸湿性对比重测试的影响。

改良方法中比重测试误差主要来源于土样含水率的测试误差。±0.5% 自然含水率测试误差引起的 7 种不同土样比重测试误差均在 ±0.024 内，均不超过其真实比重值的 0.9%，表明该测试方法较现行规范中的比重瓶法结果稳定、重复性好。

参考文献：

[1] MOKHTARI M，RAFSANJANI A，SHARIATMADARI N. The effect of aging on the compressibility behavior and the physical properties of municipal solid wastes：A case study of Kahrizak landfill，Tehran[J]. Environmental earth sciences，2019，78(16)：519.

[2] BERN A K，GHOSH A. Regression model for prediction of optimum moisture content and maximum dry unit weight of fine grained soil[J]. International journal of geotechnical engineering，2011，5(3)：297-305.

[3] HANSON J L，YESILLER N，STOCKHAUSEN S A V，et al. Compaction characteristics of municipal solid waste[J]. Journal of geotechnical & geoenvironmental engineering，2010，136(8)：1095-1102.

[4] NAZLI Y，HANSON J L，COX J T，et al. Determination of specific gravity of municipal solid waste[J]. Waste management，2014，34(5)，848-858.

[5] GOFAR N，KASSIM K A. Inrtoduction to geotechnical engineering[M]. Revised edition. South Asia：Pearson Education，2007.

[6] 张克恭，刘松玉. 土力学[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.

[7] HOLTZ R D，KOVACS W D，SHEAHAN T C. An introduction to geotechnical engineering[M]. South Asia：Pearson Education，2011.

[8] ASTM international. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer：ASTM D854-14[S]. West Conshohocken：PA，2014.

[9] BSI. British standard methods of test for soil for engineering purposes：classification tests：BS：1377-Part 2[S]. London：BSI，1990.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土木试验方法标准：GB/T50123－2019[S]. 北京：中国计划出版社，2019.

[11] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程：JTG E40－2007[S]. 北京：人民交通出版社，2007.

[12] 薛靓. 粉末密度的测定方法及误差分析[J]. 中国测试，2004(6)：31-32.
XUE Liang. Determination and error analysis of powder density[J]. China measurement & test，2004(6)：31-32(in Chinese).

[13] BOWLES J E. Foundation analysis and design[M]. New York：The McGraw-Hill Companies，Inc. ，1997：29.

[14] Texas Department of Transportation. Test procedure for determining the specific gravity of soils：TEX-108-E[S]. Texas：Txdot designation，1999.

[15] PRAKASH K，SRIDHARAN A K，THEJAS H K，et al. A simplified approach of determining the specific gravity of soils solids[J]. Geotechnical and geological engineering，2012，30(4)：1063-1067.

[16] FEDERICO A M，MICCOLI D，MURIANNI A，et al. An indirect determination of the specific gravity of soil solids[J]. Engineering geology，2018，239：22-26.

[17] MIHOUBI D，BELLAGI A. Thermodynamic analysis of sorption isotherms of bentonite[J]. The journal of chemical thermodynamics，2005，38(9)：1105-1110.

[18] 王平全. 粘土表面结合水定量分析及水合机制研究[D]. 成都：西南石油学院，2001.

[19] 袁建滨. 粘土中结合水特性及其测试方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
[20] 刘月妙,陈璋如. 内蒙古高庙子膨润土作为高放废物处置库回填材料的可行性[J]. 矿物学报,2001,21(3):541-543.
LIU Yuemiao, CHEN Zhangru. The feasibility of using Bentonite from Gaomiaozi in Inner Mongolia as backfill material for high-level radioactive waste repository[J]. Actamineralogica Sinica,2001,21(3):541-543(in Chinese).
[21] 叶为民,赖小玲,刘毅,等. 高庙子膨润土微观结构时效性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(12):2255-2261.
YE Weimin, LAI Xiaoling, LIU Yi, et al. Experimental study on ageing effects on microstructure of unsaturated GMZ01 Bentonite[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2013,35(12):2255-2261(in Chinese).
[22] 秦冰,陈正汉,刘月妙. 高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(5):756-763.
QIN Bing, CHEN Zhenghan, LIU Yuemiao. Research onthree-dimensional expansion force characteristics of Gaomiaozi Bentonite GMZ001[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2009,31(5):756-763(in Chinese).
[23] YE W M,CUI Y J,QIAN L X,et al. An experimental study of the water transfer through confined compacted GMZ bentonite[J]. Engineering geology,2009,108(3/4):169-176.
[24] 潘倩. 土-膨润土竖向隔离墙力学行为及其对防污性能影响[D]. 杭州:浙江大学,2016.
[25] 彭磊,李晓月,杜守继,等. 高庙子钠基膨润土纳米孔隙结构的同步辐射小角散射[J]. 硅酸盐学报,2019,47(10):1458-1466.
PENG Lei, LI Xiaoyue, DU Jishou, et al. Synchrotronradiation small-angle scattering of Nano-pore structure of Gaomiaozi Na-based Bentonite[J]. Journal of the Chinese ceramic society,2019,47(10):1458-1466(in Chinese).
[26] 廖义玲,毕庆涛,席先武,等. 关于红黏土先期固结压力的探讨[J]. 岩土力学,2006,27(11):1931-1934.
LIAO Yiling, BI Qingtao, XI Xianwu, et al. Discussion on the preliminary consolidation pressure of red clay[J]. Rock and soil mechanics,2006,27(11):1931-1934(in Chinese).
[27] 朱建群,易亮,龚琰,等. 贵州红黏土的胀缩性与水敏性研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(4):35-39.
ZHU Jianqun, YI Liang, GONG Yan, et al. Study on the expansion and shrinkage and water sensitivity of Guizhou red clay[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(natural science edition),2016,31(4):35-39(in Chinese).

(编辑 史淑英)

(上接第 1107 页)

[24] 刘志杰,朱志武,谢东海,等. 基于线性黏弹性模型的冻土动态本构关系[J]. 西南科技大学学报,2015,30(4):85-88.
LIU Zhijie, ZHU Zhiwu, XIE Donghai, et al. Dynamic constitutive relation of frozen soil based on liner viscoelastic model[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology,2015,30(4):85-88(in Chinese).
[25] 马冬冬. 动静组合加载下人工冻土动态力学特性及本构模型研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2018.
[26] 单仁亮,宋永威,宋立伟,等. 西北人工冻结红砂岩的动态时效损伤模型[J]. 煤炭学报,2018,43(1):118-123.
SHAN Renliang, SONG Yongwei, SONG Liwei, et al. Time dependent damage model of northwest artificial frozen red sandstone under dynamic loading[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):118-123(in Chinese).
[27] LI X B, ZOU Y, ZHOU Z L. Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method[J]. Rock mechanics and rock engineering,2014,47(5):1693-1709.
[28] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2004,41(8):1413-1426.
[29] ASHWORTH E N, ABELES F B. Freezing behavior of water in small pores and the possible role in the freezing of plant tissues[J]. Plant physiology,1984,76(1):201-204.
[30] KOZLOWSKI T. A simple method of obtaining the soil freezing point depression, the unfrozen water content and the pore size distribution curves from the DSC peak maximum temperature[J]. Cold regions science and technology,2016,122:18-25.
[31] TIAN H H, WEI C F, LAI Y M, et al. Quantification of water content during freeze-thaw cycles: A nuclear magnetic resonance based method[J]. Vadose zone journal,2018,17(1):1-12.
[32] TANG Z Q, ZHAI C, ZOU Q L, et al. Changes to coal pores and fracture development by ultrasonic wave excitation using nuclear magnetic resonance[J]. Fuel,2016,186:571-578.
[33] WENG L, WU Z J, LI X B. Mesodamage characteristics of rock with a pre-cut opening under combined static-dynamic loads: A nuclear magnetic resonance (NMR) investigation[J]. Rock mechanics and rock engineering,2018,51(8):2339-2354.
[34] ÍNCE Í, FENER M. A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated pyroclastic rocks due to freeze-thaw cycle[J]. Journal of African earth sciences,2016,120:134-140.
[35] SHEN Y J, WANG Y Z, ZHAO X D, et al. The influence of temperature and moisture content on sandstone thermal conductivity from a case using the artificial ground freezing(AGF) method[J]. Cold regions science and technology,2018,155:149-160.
[36] 王礼立,PLUVINAGE G,LABIBES K. 冲击载荷下高聚物动态本构关系对粘弹性波传播特性的影响[J]. 宁波大学学报,1995,8(3):30-57.
WANG Lili, PLUVINAGE G, LABIBES K. The influence of dynamic constitutive relations of polymers at impact loading on the viscoelastic wave propagation character[J]. Journal of Ningbo University,1995,8(3):30-57(in Chinese).

(编辑 张璐)